

## การวิเคราะห์หาความน่าเชื่อถือของโครงสร้างอาคารก่อนและหลังการเสริมกำลัง เนื่องจากการต่อเติมโครงสร้างเหล็กบนดาดฟ้าของอาคาร

### Reliability Analysis Before and After Strengthening the Existing Structure due to addition of Steel Structure on the Building's Roof

ไพโรจน์ ศรีอ่อน <sup>1,\*</sup> และ สหรัฐ พุทธรณณะ <sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

\*Corresponding author; E-mail address: psrion.gm@gmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษา การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างคานและพื้นชั้นดาดฟ้าของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 6 ชั้น คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ก่อนและหลังการออกแบบปรับปรุงเสริมกำลัง ด้วยวิธี CFRP, แผ่นเหล็ก และ ferrocement เพื่อให้โครงสร้างพื้นและคานสามารถรับน้ำหนักโครงสร้างส่วนที่ต่อเติมเพื่อใช้เป็นห้องปฏิบัติการวิจัยและห้องเรียน การวิเคราะห์ใช้วิธีการคำนวณหาโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนของโครงสร้างคานและพื้นที่เกิดขึ้นทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงเสริมกำลัง นำมาเปรียบเทียบกับความแตกต่างกันเพียงใด จากนั้นจึงนำค่าดัชนีความน่าเชื่อถือของโครงสร้างหลังการปรับปรุงเสริมกำลัง มาเทียบกับค่าดัชนีความน่าเชื่อถือเป้าหมาย ผลของการปรับปรุงเสริมกำลังทำให้ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือหลังการเสริมกำลัง มีค่ามากกว่าค่าดัชนีความน่าเชื่อถือก่อนเสริมกำลัง

คำสำคัญ: โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก, ความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง, ดรรชนีความน่าเชื่อถือ

#### Abstract

The proposed research is a reliability analysis of reinforced concrete beams and roof slab structures of a 6-story reinforced concrete building, Faculty of Architecture and Planning, Thammasat University, Rangsit Center, before and after strengthening design using CFRP method, steel plate, and ferrocement, so that the slab and beam structures can support the additional steel structures used for co-research laboratories and classrooms. Before and after the strengthening, the analysis was utilized to calculate the bending moment and shear of the beam structure and the roof slab. Considering

how dissimilar they are after that, the structural reliability index was calculated and compared to the reliability index target. The reliability index after strengthening is higher than the reliability index before strengthening.

Keywords: Reinforcement concrete structure, Structural Reliability, Reliability Index

#### 1. คำนำ

ในปัจจุบันมีอาคารที่ก่อสร้างเสร็จแล้วมากมายที่มีการปรับปรุง ดัดแปลง ต่อเติมโครงสร้างอาคารเพื่อเพิ่มพื้นที่ใช้สอย แต่อาคารส่วนใหญ่ ไม่ได้ออกแบบเผื่อการรับน้ำหนักส่วนที่ต่อเติมในอนาคต ทำให้เกิดการเพิ่มน้ำหนักส่วนที่ต่อเติม ทำให้อาคารมีภาระการรับน้ำหนักที่มากขึ้น วิศวกรผู้ออกแบบและควบคุม จำเป็นต้องทำการตรวจสอบอาคารเดิมเพื่อให้ทราบถึงความมั่นคงของโครงสร้างและความสามารถในการรับน้ำหนัก ว่าสามารถที่จะรับน้ำหนักส่วนที่ต่อเติมได้หรือไม่ วิศวกรผู้ควบคุมจะเป็นผู้ทำการปรับปรุงเสริมกำลังโครงสร้าง เพื่อรักษาประสิทธิภาพของโครงสร้างนั้น ไม่ให้เกิดความเสียหาย แต่จะทราบได้อย่างรวดเร็วการเสริมกำลังเพียงพอหรือไม่ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพื่อประเมินหาความน่าเชื่อถือของโครงสร้างหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็กชั้นดาดฟ้า ซึ่งประกอบด้วยคานคอนกรีตเสริมเหล็กและพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งคานและพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับภาระน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น โดยที่ผู้วิจัยได้ทำการเลือกโครงสร้างที่การรับน้ำหนักเพิ่มสูงสุด โครงสร้างที่มีการเสียรูปและโครงสร้างที่เกิดความเสียหาย โดยได้ทำการเลือกคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B-122 ตรงบริเวณ GL. B.1/5-6, คาน B-123 ตรงบริเวณ GL. F/5-6, คาน B-127

ตรงบริเวณ GL. C/2-3, คาน B-128A ตรงบริเวณ GL. E/1-2, คาน B-134 ตรงบริเวณ GL. G-H/2 และคาน B-134 ตรงบริเวณ GL. C-D/2 ซึ่งคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมดเป็นโครงสร้างที่อยู่บริเวณพื้นชั้น 7 ของอาคาร

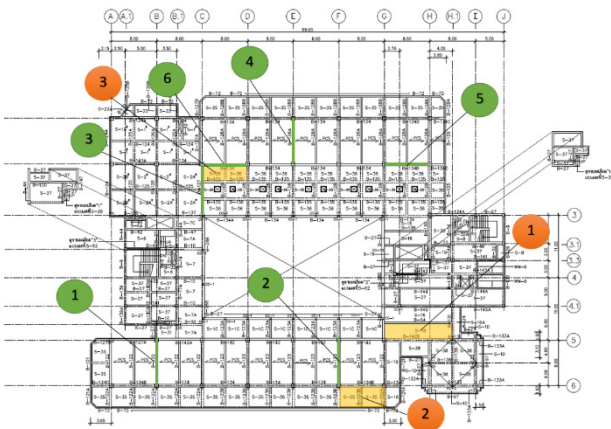
ตารางที่ 1 ตำแหน่งและขนาดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการวิจัย

ลำดับ	โครงสร้าง	ขนาด
1	B-122 ตรงบริเวณ GL. B.1/5-6	30 ซม. x 80 ซม. ยาว 8 เมตร
2	B-123 ตรงบริเวณ GL. F/5-6	35 ซม. x 80 ซม. ยาว 8 เมตร
3	B-127 ตรงบริเวณ GL. C/2-3	25 ซม. x 80 ซม. ยาว 9 เมตร
4	B-128A ตรงบริเวณ GL. E/1-2	30 ซม. x 80 ซม. ยาว 8 เมตร
5	B-134B ตรงบริเวณ GL. G-H/2	30 ซม. x 80 ซม. ยาว 8 เมตร
6	B-134 ตรงบริเวณ GL. C-D/2	30 ซม. x 80 ซม. ยาว 8 เมตร

ในส่วนของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่นำมาวิจัย ได้แก่พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก S-16 ตรงบริเวณ GL. G-H/4.1-5, พื้น S-35 ตรงบริเวณ GL F-G/6 และพื้น S-36 ตรงบริเวณ GL. C-D/2-3 ซึ่งพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมดเป็นโครงสร้างที่อยู่บริเวณพื้นชั้น 7 ของอาคารเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2 ตำแหน่งและขนาดของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการวิจัย

ลำดับ	โครงสร้าง	ขนาด
1	S-16 ตรงบริเวณ GL. G-H/4.1-5	หนา 12 ซม.
2	S-35 ตรงบริเวณ GL F-G/6	หนา 12 ซม.
3	S-36 ตรงบริเวณ GL. C-D/2-3	หนา 12 ซม.



รูปที่ 1 ตำแหน่งพื้นและคานที่ทำการวิจัย

เนื่องด้วยในปัจจุบัน มาตรฐานการออกแบบ การก่อสร้างซ่อมแซม ปรับปรุง การตรวจสอบ และการประเมิน ทั้งทางด้านกำลังและสภาพของโครงสร้าง ต้องประกอบด้วยความน่าเชื่อถือเป็นส่วนใหญ่ทั้งในด้านกำลังของวัสดุก่อสร้าง ความสามารถเป็นส่วนใหญ่ทั้งในด้านกำลังของวัสดุก่อสร้าง ความสามารถในการทำงาน และข้อจำกัดต่างๆ ของการก่อสร้างจากการวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการกระจายตัวแบบ Normal Distribution
2. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการกระจายตัวแบบ Log-Normal Distribution
3. เพื่อศึกษาหาค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ (Reliability Index) ของโครงสร้างด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบ First Order Second Moment (FOSM)
4. เพื่อศึกษาหาค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ (Reliability Index) ของโครงสร้างด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบ First Order Reliability Method (FORM)
5. เพื่อศึกษาวิเคราะห์ค่าความปลอดภัยของโครงสร้างก่อนและหลังเสริมกำลังแตกต่างกันอย่างไร

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ความน่าเชื่อถือโครงสร้าง (Reliability of Structures)

การออกแบบโดยมีหลักการ ให้มีความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง มีความน่าจะเป็น (Probability) อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

2.1.1 ความน่าจะเป็น (Probability) ที่เหตุการณ์ที่เราสนใจจะเกิดขึ้น หรือ  $P(E)$  คำนวณได้ตามสมการที่ (1)

$$P(E) = \frac{n(E)}{n(S)} \quad (1)$$

### 2.1.2 ตัวแปรสุ่ม (Random Variables)

Random Variable (RV) หรือ ตัวแปรสุ่ม คือฟังก์ชันที่กำหนดผลลัพธ์จากการทดลองของแต่ละเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นใน Sample Space ให้เป็นตัวเลข เช่น Strength ของคอนกรีตหรือ วัสดุอื่น ๆ หรือ น้ำหนักบรรทุกต่างๆ (Load) จำนวนต่างๆ เป็นค่าผลลัพธ์ที่ไม่คงที่ และมีความไม่แน่นอนหรือการเปลี่ยนแปลงอยู่เหนือการควบคุม

### 2.1.3 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น (Basic Function)

1) Probability Mass Function (PMF) หรือ ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสำหรับแปรสุ่มแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Random Variables) โดยการหาค่าความน่าจะเป็นของตัวแปรต่าง ๆ ที่อยู่ใน Sample Space หรือในเหตุการณ์ที่สนใจ กรณีที่  $X$  เป็นตัวแปรสุ่มแบบไม่ต่อเนื่อง โดยที่  $X$  จะมีค่าเป็น  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  ความน่าจะเป็นที่  $X = x$  เรียกว่า ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ  $X$  ใช้สัญลักษณ์

$$P_x(X) = P[X = x] \quad (2)$$

2) Probability Density Function (PDF) หรือฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสำหรับตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง (Continuous Random Variables) แต่เนื่องจากตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง มีมากมายจนนับไม่ได้ หรือไม่สามารถระบุได้เป็นค่าคงที่ ในการหาค่าความน่าจะเป็น จึงไม่สามารถหาได้จากสูตรทั่วไป การหาค่าความน่าจะเป็นจึงต้องทำการคำนวณภายในช่วงที่สนใจ เช่น  $P(0 < X < 10)$  หรือ  $P(X > 2.00)$  โดยใช้หลักการหาพื้นที่เมื่อทราบฟังก์ชันความน่าจะเป็น แทนการแสดงจำนวนสมาชิกและหาสัดส่วนสมาชิกที่เราสนใจต่อสมาชิกทั้งหมดใน Sample Space

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx \quad (3)$$

3) Cumulative Distribution Function (CDF) หรือ ฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม ของ Probability Density Function (PDF) สำหรับตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง (Continuous Random Variables) และของ Probability Mass Function (RMF) สำหรับตัวแปรสุ่มแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Random Variables) โดยเป็นผลรวมของความน่าจะเป็นจากตัวแปรสุ่ม X ที่ต่ำสุด จนถึงค่าความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มที่สนใจ x โดยมีสัญลักษณ์ที่ใช้คือ  $F_X(x)$

#### 2.1.4 Uniform Random Variables

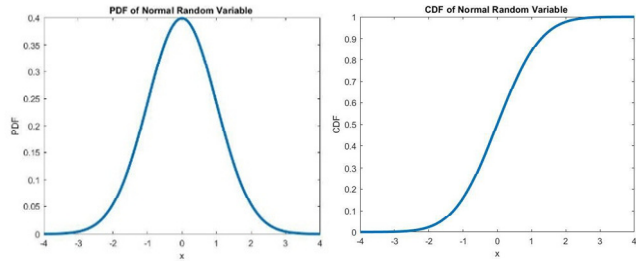
สำหรับ Uniform Random Variables ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง หรือ PDF จะประกอบด้วยค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดของตัวแปรสุ่มในช่วง  $[a, b]$  ซึ่งหมายความว่า ทุกค่ามีโอกาสเกิดขึ้นเท่าๆ กันทุกค่า

$$PDF = f_x(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

#### 2.1.5 Normal Random Variables

Normal Random Variables ใน Normal Distribution (หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Gaussian Distribution) เป็นการแจกแจงที่สำคัญที่สุดในทฤษฎีความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง (Reliability of Structure) โดยมีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่องหรือ PDF ดังนี้

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \right] \quad (5)$$



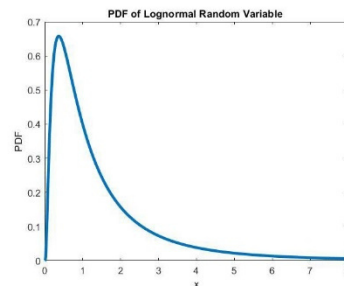
รูปที่ 2 PDF และ CDF ของ Normal Random Variable

#### 2.1.6 Log-Normal Random Variables

ตัวแปรสุ่ม X จะเป็น Log-Normal Random Variables เมื่อ  $Y = \ln(X)$  เป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) โดยที่ Log-Normal Random Variables มีค่าเป็นบวกเท่านั้น ( $x \geq 0$ ) โดยที่กราฟ PDF ของ Log-Normal Random Variables จะเบ้ขวา หรือ มีค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้เป็นค่าบวก (Positive Skewness)

$$\sigma_{\ln(x)}^2 = \ln(V_x^2 + 1) \quad (6)$$

$$\mu_{\ln(x)} = \ln(\mu_{\ln(x)}) - \frac{1}{2} \sigma_{\ln(x)}^2 \quad (7)$$



รูปที่ 3 PDF ของ Lognormal Random Variable

## 2.2 การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง (Structural Reliability Analysis)

### 2.2.1 ขีดจำกัด (Limit State)

Limit State คือ ขีดจำกัดในการรับแรงของโครงสร้าง ซึ่งเกิดจากโครงสร้าง มีโอกาสเป็นไปได้ว่า จะสามารถวิบัติได้หลากหลายรูปแบบ โดยที่หากรูปแบบใดมีกำลังรับแรงกระทำได้น้อยที่สุด หรือ Limit state นั้นได้มีน้ำหนักบรรทุกทุกถึงจุดที่ทำให้โครงสร้างวิบัติได้ Limit State นั้นจะเป็นตัวควบคุมโครงสร้างดังกล่าวในการวิบัติได้เช่น การวิบัติแบบโก่งเดาะ การวิบัติเนื่องจากแรงดัด การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน เป็นต้น

### 2.2.2 ฟังก์ชันภาวะขีดจำกัด (Limit States Functions)

Limit States Functions โดยในการวิเคราะห์โครงสร้างทั่วไปนั้น จะวิเคราะห์ระหว่างแรงที่กระทำกับโครงสร้างหรือน้ำหนักบรรทุก (Load, Q) และกำลังต้านทานของโครงสร้าง (Resistance, R) โดยที่แรงกระทำทั้งสองที่นำมาวิเคราะห์จะอยู่ในรูปแบบของตัวแปรสุ่ม (Random Variable) ซึ่งทำให้มีโอกาสที่ก้ำกั้วต้านทานของโครงสร้างน้อยกว่าน้ำหนักบรรทุก

หรือแรงที่กระทำกับโครงสร้าง ซึ่งทำให้เกิดการวิบัติ (Failure) ขึ้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมาวิเคราะห์หาความน่าเชื่อถือของโครงสร้างและพฤติกรรมต่างๆ ของโครงสร้างในภาวะที่ก่อให้เกิดการวิบัติ สามารถนำมากำหนดเป็นฟังก์ชัน ภาวะขีดจำกัด (Limit States Functions) ได้ดังสมการที่ (8)

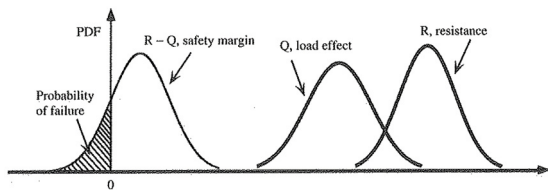
$$Z = g(x) = R - Q \quad (8)$$

โดยที่หาก  $g(x) > 0$  จะถือว่าโครงสร้างอยู่ในสภาวะปลอดภัย (Safety Mode) ในทางกลับกัน หาก  $g(x) < 0$  โครงสร้างจะไม่ปลอดภัย (Failure Mode) และโครงสร้างอยู่ในสภาวะสมดุล  $g(x) = 0$  จะ

เรียกว่า "ผิวของการวิบัติ (Failure Surface)" ซึ่งคือ ฟังก์ชันภาวะขีดจำกัด (Limit State Functions) นั้นเอง

The Probability of Failure,  $P_f$  จะมีค่าเท่ากับความน่าจะเป็นของ Failure Mode โดยที่จะแสดงในรูปแบบของ Limit State Function และสามารถหาได้ดังสมการที่ (9)

$$P_f = P(R - Q < 0) = P(g < 0) \quad (9)$$



รูปที่ 4 กราฟ PDF ของ Load, Resistance และ Safety margin

โดยความน่าเชื่อถือของโครงสร้างที่เกิดขึ้นนั้น สามารถพิจารณาได้หาก  $P(R > Q)$  จะถือว่า โครงสร้างอยู่ในสภาวะปลอดภัย หรือ  $P(R > Q) = P_s$  และหาก  $P(R < Q)$  จะถือว่าโครงสร้างอยู่ในสภาวะไม่ปลอดภัย หรือ  $P(R < Q) = P_f$  และในทางกลับกันถ้าความน่าจะเป็นอยู่ในรูป  $P(R < Q)$  ซึ่งก็หมายความว่า โครงสร้างนั้นไม่ปลอดภัยหรือมีโอกาสในการวิบัติ นั่นก็คือ Probability of Failure หรือ  $P(R < Q) = P_f$

### 2.2.3 ส่วนต่างความปลอดภัย (Margin of Safety)

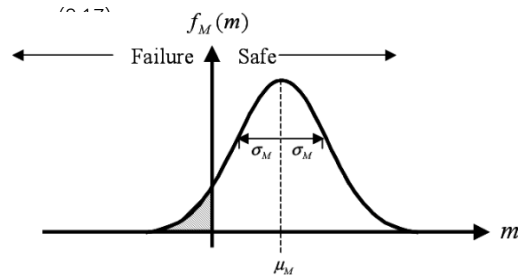
ส่วนต่างความปลอดภัยนั้นพิจารณาจากกำลังต้านทานของโครงสร้าง (Resistance) ลบกับ ค่าน้ำหนักบรรทุก (Load) โดยที่  $M = X(\text{Resistance}, R) - Y(\text{Load}, Q)$  ซึ่งหากค่า  $M < 0$  จะมีความหมายว่า มีโอกาสที่โครงสร้างจะวิบัติสูงมาก และจะนำมาพิจารณาในรูปแบบของกราฟ PDF ดังรูปที่ 5 โดยมีสมการดังนี้

$$\text{Safety Margin, } M = X - Y \quad (10)$$

$M > 0$ ; Safe State,  $M < 0$ ; Failure state

$M = 0$ ; Limit State

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_M(m) dm = F_M(0) \quad (11)$$

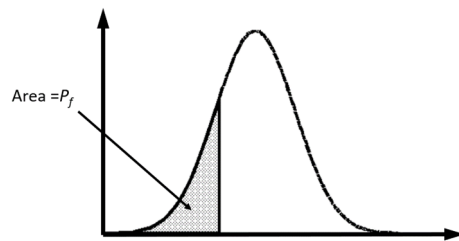


รูปที่ 5 กราฟ PDF แสดงถึง ส่วนต่างความปลอดภัย (Margin of Safety)

### 2.2.4 ค่าความปลอดภัย (The Factor of Safety, F.S.)

ค่าความปลอดภัยนั้นจะพิจารณาจาก กำลังต้านทานของโครงสร้าง (Resistance) ทหารกับค่าน้ำหนักบรรทุก (Load) โดยที่  $F.S. = X(\text{Resistance}, R) / Y(\text{Load}, Q)$  ซึ่งหากค่า  $F.S. < 1$  จะมีความหมายว่า จะมีโอกาสที่โครงสร้างจะวิบัติสูงมาก และจะนำมาพิจารณาในรูปแบบของกราฟ PDF ดังรูปที่ 6 โดยมีสมการดังนี้

$$P_f = \int_0^1 f_{F.S.}(\theta) d\theta = F_{F.S.}(1.0) \quad (12)$$



รูปที่ 6 กราฟ PDF แสดงถึง ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety)

### 2.2.5 ดรรชนีความน่าเชื่อถือ (Reliability Index)

Reduced Variables

$$Z_R = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \quad (13)$$

$$Z_Q = \frac{Q - \mu_Q}{\sigma_Q} \quad (14)$$

เมื่อ  $Z_R$  และ  $Z_Q$  คือ Reduced Variables

$$R = \mu_R + Z_R \sigma_R \quad (15)$$

$$Q = \mu_Q + Z_Q \sigma_Q \quad (16)$$

นำสมการดังกล่าวมาแทนค่าใน  $g(R,Q) = R - Q$  จะได้รูปแบบของ Reduced Variables แสดงดังสมการที่ (17)

$$g = (Z_R \sigma_R) = (\mu_R - \mu_Q) + Z_R \sigma_R - Z_Q \sigma_Q \quad (17)$$

รูปแบบทั่วไปของ กระจายความน่าเชื่อถือ  
รูปแบบของ Normal Distribution

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (18)$$

รูปแบบของ Log-Normal Distribution

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{\bar{R}}{\bar{Q}}\right)}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}} \quad (19)$$

เมื่อค่าความน่าเชื่อถือ ( $\beta$ ) คือค่าส่วนกลับของ สัมประสิทธิ์ของการแปรผัน (Coefficient of Variation (COV)) (Coefficient of Variation (COV)) ของฟังก์ชัน  $g(R,Q) = R - Q$  โดยที่ตัวแปร R และ Q ไม่สัมพันธ์กัน ดังนั้นค่าความน่าเชื่อถือ จะสามารถหาค่า Probability of Failure ดังสมการที่ (20) และ Probability of Survival ดังสมการที่ (21)

$$p_f = 1 - p_s = P(R < Q) = 1 - \Phi(\beta) \quad (20)$$

$$p_s = P(R > Q) = \Phi(\beta) \quad (21)$$

2.2.6 การวิเคราะห์ค่าความน่าเชื่อถือด้วยวิธี First-Order Second-Moment (FOSM)

2.2.6.1 Linear Limit States Function

$$g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i \quad (22)$$

เมื่อ  $a_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ) เป็นค่าคงที่ และ  $X_i$  จะอยู่ในรูปของตัวแปรสุ่มที่ไม่มีความสัมพันธ์กัน ถ้าใช้วิธี Hasofer-Line Reliability Index เราจะสามารถหาค่า  $\beta$  ได้ดังสมการที่ (23)

$$\beta = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i \sigma x_i)^2}} \quad (23)$$

2.2.6.2 NonLinear Limit States Function

เช่นเดียวกับวิธี Linear Limit States Function โดยใช้เทอมแรงของ Taylor Series Expansion ในการประมาณค่าซึ่งจะใช้ความแปรปรวนของพารามิเตอร์ จะสามารถหาค่า Nonlinear Limit State Function ซึ่งจะแสดงการกระจายตัวได้ดังสมการที่ (24)

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) \approx g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) \approx g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) + \sum_{i=1}^n (X_i - X_i^*) \frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{\text{evaluated at } (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)} \quad (24)$$

โดย linearization Point นี้จะเหมือนกัน ดังนั้นค่า Mean ของตัวแปรสุ่ม Nonlinear Function จะแสดงในสมการที่ (25)

$$g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \approx g(X_1^*, X_2^*, X_3^*, \dots, X_n^*) + \sum_{i=1}^n (X_i - X_i^*) \frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{\text{evaluated at mean values}} \quad (25)$$

และจะสามารถหาค่า  $\beta$  ของ Nonlinear Function ได้ดังนี้

$$\beta = \frac{g(\mu x_1, \mu x_2, \dots, \mu x_n)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i \sigma x_i)^2}} \quad (26)$$

$$\text{เมื่อ } a_i = \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{\text{evaluated at mean values}}$$

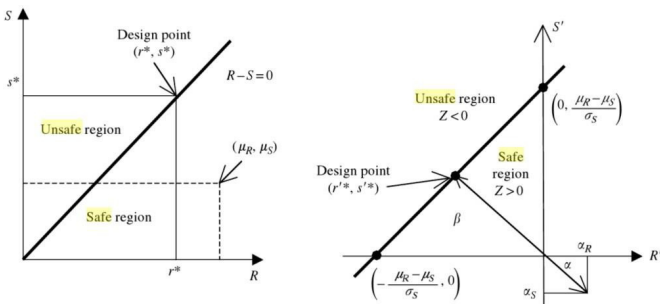
2.2.7 การวิเคราะห์ค่าความน่าเชื่อถือด้วยวิธี First Order Reliability Method (FORM)

First Order Reliability Moment (FORM) สามารถเรียกได้อีกชื่อ ว่าวิธีคิดของ Hasofer-Lind โดยวิธีนี้ประเมินค่าความน่าเชื่อถือโดยยึดหลักการเปลี่ยนแปลง หรือ อนุพันธ์ของปัญหาในระบบพิกัด

มาตรฐาน ดังนั้น ค่าตัวแปรสุ่ม  $X_i$  จะมีค่าดังสมการ (27)

$$X'_i = \frac{X_i - \mu_{x1}}{\sigma_{x1}}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (27)$$

$X'_i$  เป็นตัวแปรสุ่มที่มีลักษณะเฉพาะโดยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่มีค่าเฉลี่ยศูนย์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของหน่วยสมการที่ (27) ถูกนำมาใช้ในสมการสถานะลิมิตเพื่อให้ได้สถานะลิมิตในพื้นที่ใหม่ - พื้นที่ที่ปกติลดลง ตัวแปรแต่ละตัวในสมการสถานะลิมิตจะถูกแทนที่ด้วยสมการที่ลดลงตามลำดับและจะได้สมการสถานะลิมิตที่สอดคล้องกัน นี่เรียกว่าการแปลงพื้นที่ปกติจากปกติเดิมเป็นปกติลดลงแสดงในรูปแบบที่ 7 พื้นผิวสถานะขีด จำกัด ในระบบปกติลดลงเรียกว่า  $g(X') = 0$



รูปที่ 7 พิกัดเดิม พิกัดลดทอนค่า (Haldrar และ Mahadevan)

รูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสุ่มของฟังก์ชันสถานะจำกัดจากระบบปกติเดิมเป็นระบบปกติลดลง ในที่นี้จะอธิบายได้ว่าทำไมระยะทางต่ำสุดตามที่กำหนดไว้ก่อนหน้านั้นคือดัชนีความน่าเชื่อถือ การแปลงตัวแปร R และ S เป็นดังนี้:

$$R' = \frac{(R - \mu_R)}{\sigma_R} \quad \text{และ} \quad S' = \frac{(S - \mu_S)}{\sigma_S} \quad (28)$$

ตอนนี้สมการที่ลดลงของ R และ S ถูกแทนที่ในสมการสถานะจำกัดเพื่อให้ได้พื้นผิวสถานะจำกัดใหม่ในพื้นที่มาตรฐานของพิกัด

$$Z = \sigma_R R' - \sigma_S S' + \mu_R - \mu_S \quad (29)$$

ดัชนีความน่าเชื่อถือคำนวณโดยใช้สมการที่ (30) ดัชนีความน่าเชื่อถือสามารถประมาณได้ดังนี้

$$\beta_{HL} = \sqrt{(x^*)^T + (x^*)} \quad (30)$$

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (31)$$

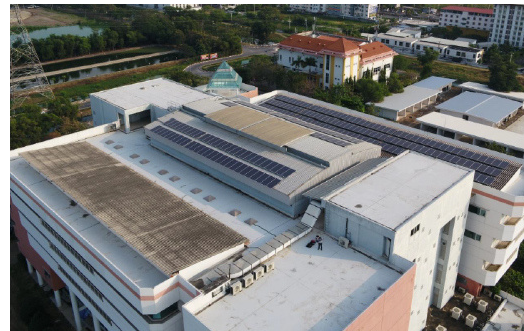
Probability of failure สามารถคำนวณได้จากตรงนี้ความน่าเชื่อถือดังนี้

$$P_f = (-\beta_{HL}) \quad (32)$$

### 3. วิธีการวิจัย

#### 3.1 ดำเนินการศึกษาแบบแปลนและผลการตรวจสอบอาคารก่อนทำการต่อเติมโครงสร้างเหล็กบนตาดฟ้าอาคาร

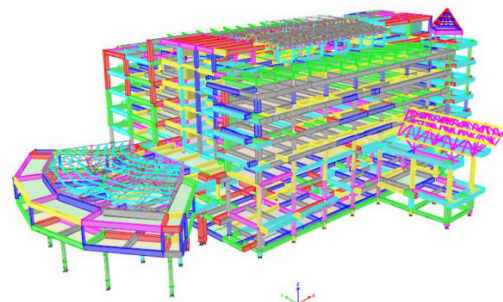
การศึกษาแบบแปลนโครงสร้างอาคารคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต การศึกษาในส่วนของรายละเอียดที่เป็นองค์ประกอบของอาคาร ไม่ว่าจะเป็นพื้น คาน เสา หรือฐานราก รวมทั้งแบบแปลนของบริเวณชั้นที่ทำการต่อเติมดังรูปที่ 8 และศึกษาในส่วนความสามารถในการรับแรง ความเสียหายของอาคารจากผลการตรวจสอบและประเมินโครงสร้างโดยเฉพาะโครงสร้างคาน เพื่อเป็นปัจจัยในการวิเคราะห์จุดที่ควรมีการเสริมกำลังให้โครงสร้างเพื่อป้องกันความเสียหายและการวิบัติขององค์อาคารเมื่อมีการรับแรงเพิ่มเติม



รูปที่ 8 บริเวณชั้นตาดฟ้าของอาคารก่อนการต่อเติม

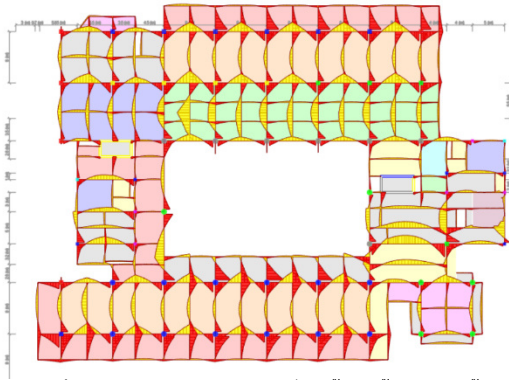
#### 3.2 วิเคราะห์โครงสร้างอาคารก่อนและหลังการต่อเติมอาคารเพื่อหาค่าน้ำหนักที่กระทำต่ออาคารเพิ่มขึ้น

วิเคราะห์การรับน้ำหนักของโครงสร้างอาคารจากผลการตรวจสอบอาคารและใช้การโปรแกรมสำเร็จรูปในการวิเคราะห์ สำหรับคำนวณและตรวจสอบการรับน้ำหนักรวมทั้งการเสียรูปของอาคารหลังจากการต่อเติมพร้อมสร้างแบบจำลองสามมิติที่ทำการศึกษาดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แบบจำลองด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง

และหาหน่วยแรงต่างๆ เช่น ค่าแรงเฉือน โมเมนต์ดัด ที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 10 นำมาเปรียบเทียบ หากโครงสร้างคานมีค่ากำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างที่ยอมให้น้อยกว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริง จะต้องมีการเสริมกำลังโครงสร้างคานและพื้นในตำแหน่งดังกล่าว



รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ที่เกิดขึ้นกับพื้นและคานชั้น 7

### 3.3 ศึกษาสถานที่จริงของกรณีศึกษาโดยการตรวจสอบความเสียหายของอาคารจากสายตาก่อนการใช้เครื่องมือในการตรวจสอบโครงสร้างจริง

สำรวจและประเมินสถานภาพเบื้องต้นของอาคารทางกายภาพ โดยสำรวจความเสียหายของอาคารดังรูปที่ 11 เพื่อนำภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ทำการศึกษาเพื่อดูลักษณะและสาเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้น และทดสอบทางวิศวกรรมโครงสร้าง สุ่มตรวจสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตร่วมกับกลุ่มตรวจสอบประเมินโครงสร้างเสา ตรวจสอบรายละเอียดการเสริมเหล็กในตำแหน่งที่มีการปรับปรุงโครงสร้าง และนำผลการทดสอบทางวิศวกรรมไปประกอบการวิเคราะห์ประเมินความแข็งแรงของโครงสร้าง

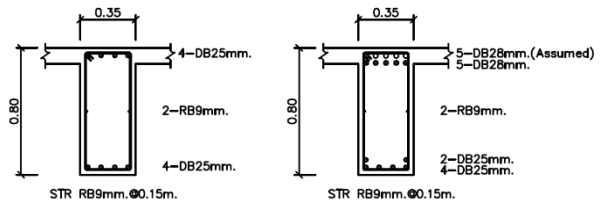


รูปที่ 11 บริเวณที่เกิดความเสียหายเนื่องจากการต่อเติมโครงสร้าง

### 3.4 คำนวณแรงที่กระทำกับตัวโครงสร้างคานและพื้นโดยวิธีกำลัง (Ultimate Strength Design)

คำนวณแรงโดยวิธีกำลัง (Ultimate Strength Design) ขั้นตอนแรกคือ ต้องรู้น้ำหนักบรรทุกตายตัว (Dead Load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) โดยใช้สูตรคำนวณน้ำหนักบรรทุกประลัยตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยคือ  $1.4DL + 1.7LL$  บริเวณคานและพื้น

ตามตารางที่ 1 และตารางที่ 2 เพราะเป็นตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุด โดยการนำผลการทดสอบความแข็งแรงของคอนกรีตด้วย Schmidt Hammer และ Ultrasonic Pulse Velocity หลังจากทำการแปลผลข้อมูลจากการทดสอบมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ความต้านทานของโครงสร้างที่ยังคงเหลืออยู่เพื่อตรวจสอบความสามารถใช้งาน (Serviceability)



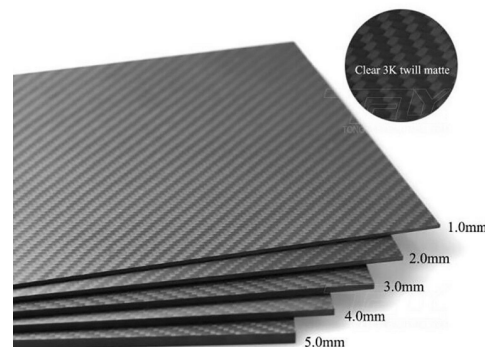
รูปที่ 12 หน้าตัดคาน B-123 ที่นำมาวิเคราะห์



รูปที่ 13 โครงสร้างเหล็กส่วนที่ต่อเติม

### 3.5 ดำเนินการออกแบบเสริมกำลังโดยใช้แผ่นเหล็ก เหล็กgrup พรรณประกับข้าง และการใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP)

การออกแบบเสริมกำลังจะทำการออกแบบด้วยวิธีการที่เหมาะสมที่สุด โดยไม่ทำให้ลักษณะของโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมเปลี่ยนแปลง และไม่ทำให้การรับกำลังของคานและพื้นสามารถรับน้ำหนักส่วนที่ต่อเติมได้อย่างปลอดภัย



รูปที่ 14 พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP)

### 3.6 การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างคานและพื้น

3.6.1 น้ำหนักบรรทุก (load Effect, Q) ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ค่าโมเมนต์ดัด (Bending Moment) และแรงเฉือน (Shear)

3.6.2 ความต้านทานเชิงโครงสร้าง (Structural Resistance, R)

3.6.3 ดรรชนีความน่าเชื่อถือ (Reliability Index,  $\beta$ )

พิจารณาให้ R และ Q เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) โดยเราจะสามารถหาค่า ความโน้มเอียงของน้ำหนักบรรทุก (Bias Factor for Load) ดังสมการที่ (32) และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (Coefficient of Variation, COV) ดังสมการ (33)

$$\text{Bias Factor, } \lambda = \frac{\bar{x}}{x_n} \quad (33)$$

$$\text{Coefficient of Variation, } Cov = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (34)$$

3.6.4 ความน่าจะเป็นความปลอดภัยเชิงโครงสร้าง (Probability of Structural Safety)

โดยความปลอดภัยเชิงโครงสร้างนั้นค่าความน่าจะเป็นของน้ำหนักบรรทุก (Q) จะมีค่าไม่เกินกว่าค่าความน่าจะเป็น ความต้านทานเชิงโครงสร้าง (R) จะเรียกว่า Probability of Survival ดังสมการที่ (20) และสมการที่ (21)

## 4. ผลการวิจัย

ในทุกโครงสร้างจะมีค่าดรรชนีความน่าเชื่อถือเป้าหมาย เพื่อเปรียบเทียบ ว่าค่าระหว่าง Load และ Resistance มีความปลอดภัยต่อการใช้งานมากน้อยเพียงใด โดยหากดรรชนีความน่าเชื่อถือเป้าหมายมีค่าน้อยกว่าค่าดรรชนีที่ได้จากการวิเคราะห์มีความหมายว่า โครงสร้างมีความปลอดภัย โดยค่าดรรชนีเป้าหมายนี้จะแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่า Bias Factor, COV. และ Reliability Index Target

Load component	Bia Factor, $\lambda_D = \mu_D/D_n$	COV., $V_D$	$\beta$ target
Moment <sup>1</sup>	1.072	0.120	3.0
Shear <sup>1</sup>	1.075	0.100	3.5

<sup>1</sup>Development of a Probability Based Criterion for American National Standard A58, 1980, P.92

จากการศึกษาการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างคาน ก่อนและหลังการปรับปรุงเสริมกำลัง พบว่าความน่าเชื่อถือของโครงสร้างคานด้านทานโมเมนต์ดัด ( $\beta$ ) ก่อนการปรับปรุงเสริมกำลังมีค่าน้อยที่สุดคือ -2.423 คือคาน B-123 โดยมีค่า Probability of Failure ( $P_f$ ) มากที่สุดคือ 0.9925 เนื่องจากเป็นคานที่มีการรับน้ำหนักส่วนที่ต่อเติม มากระทำมากที่สุดเมื่อเทียบกับคานตัวอื่นๆ ซึ่งหลังจากทำการออกแบบปรับปรุงเสริมกำลังแล้วพบว่าค่า ค่า Reliability index ( $\beta$ ) มีค่ามากที่สุดคือ 0.653 และค่า Probability of Failure ( $P_f$ ) มีค่าน้อยที่สุดคือ 0.2580 ซึ่งเป็นการปรับปรุงเสริมกำลังด้วยวิธีแผ่นเหล็กประกบข้างคาน ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ค่า Reliability Index ( $\beta$ ) ทุก limit state หลังการปรับปรุงเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กได้คานเพื่อต้านทานโมเมนต์ดัด

คาน	Q (Tons.)	R (Tons.)	ก่อนการเสริมกำลัง		หลังการเสริมกำลัง	
			$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$
B-122	19.840	16.940	-1.112	0.8665	0.024	0.4920
B-123	12.770	8.980	-2.428	0.9925	0.046	0.4800
B-127	35.840	26.460	-2.106	0.9826	0.003	0.5000
B-128A	14.790	13.390	-0.702	0.7580	0.056	0.4760
B-134B	52.480	47.140	-0.757	0.7764	0.018	0.4920
B-134	64.270	47.300	-2.127	0.9834	0.003	0.5000

ตารางที่ 5 ค่า Reliability Index ( $\beta$ ) ทุก limit state หลังการปรับปรุงเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบข้างคานเพื่อต้านทานโมเมนต์ดัด

คาน	Q (Tons.)	R (Tons.)	ก่อนการเสริมกำลัง		หลังการเสริมกำลัง	
			$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$
B-122	19.840	16.940	-1.112	0.8665	0.030	0.4880
B-123	12.770	8.980	-2.428	0.9925	0.653	0.2580
B-127	35.840	26.460	-2.106	0.9826	0.188	0.4250
B-128A	14.790	13.390	-0.702	0.7580	0.600	0.2740
B-134B	52.480	47.140	-0.757	0.7764	0.085	0.4680
B-134	64.270	47.300	-2.127	0.9834	0.078	0.4680



**ตารางที่ 6** ค่า Reliability Index ( $\beta$ ) ทุก limit state หลังการปรับปรุงเสริมกำลังด้วย CFRP เพื่อต้านทานโมเมนต์บวก

คาน	Q (Tons.)	R (Tons.)	ก่อนการเสริมกำลัง		หลังการเสริมกำลัง	
			$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$
B-122	19.840	16.940	-1.112	0.8665	0.050	0.4800
B-123	12.770	8.980	-2.428	0.9925	0.231	0.4090
B-127	35.840	26.460	-2.106	0.9826	0.130	0.4480
B-128A	14.790	13.390	-0.702	0.7580	0.678	0.2480
B-134B	52.480	47.140	-0.757	0.7764	0.067	0.4720
B-134	64.270	47.300	-2.127	0.9834	0.144	0.4440

ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างคานต้านทานแรงเฉือน ก่อนการปรับปรุงเสริมกำลัง พบว่าคาน B-127 มีค่าความน่าเชื่อถือน้อยที่สุด คือ -1.838 โดยมีค่า Probability of Failure มากที่สุดคือ 0.967 เมื่อทำการออกแบบปรับปรุงเสริมกำลัง แล้ว ค่า Probability of Failure ( $P_f$ ) มีค่าน้อยที่สุดคือ 0.127 ซึ่งเป็นการปรับปรุงเสริมกำลังด้วยการเสริมแผ่นเหล็กใต้คาน ดังแสดงในตารางที่ 7

**ตารางที่ 7** ค่า Reliability Index ( $\beta$ ) ทุก limit state หลังการปรับปรุงเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กใต้คานเพื่อต้านทานแรงเฉือน

คาน	Q (Tons.)	R (Tons.)	ก่อนการเสริมกำลัง		หลังการเสริมกำลัง	
			$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$
B-122	24.580	22.540	-0.612	0.729	0.413	0.341
B-123	22.330	20.610	-0.566	0.712	0.861	0.195
B-127	33.400	25.660	-1.838	0.967	1.139	0.127
B-128A	22.040	20.250	-0.598	0.726	0.162	0.436
B-134B	38.830	34.970	-0.739	0.770	0.480	0.316
B-134	44.050	34.410	-1.725	0.957	1.641	0.051

**ตารางที่ 8** ค่า Reliability Index ( $\beta$ ) ทุก limit หลังการปรับปรุงเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบกับข้างคานเพื่อต้านทานแรงเฉือน

คาน	Q (Tons.)	R (Tons.)	ก่อนการเสริมกำลัง		หลังการเสริมกำลัง	
			$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$
B-122	24.580	22.540	-0.612	0.729	0.337	0.367
B-123	22.330	20.610	-0.566	0.712	1.148	0.125
B-127	33.400	25.660	-1.838	0.967	0.623	0.268
B-128A	22.040	20.250	-0.598	0.726	0.450	0.326
B-134B	38.830	34.970	-0.739	0.770	0.463	0.323
B-134	44.050	34.410	-1.725	0.957	1.203	0.115

**ตารางที่ 9** ค่า Reliability Index ( $\beta$ ) ทุก limit state หลังการปรับปรุงเสริมกำลังด้วย CFRP เพื่อต้านทานแรงเฉือน

คาน	Q (T)	R (T)	ก่อนการเสริมกำลัง		หลังการเสริมกำลัง	
			$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$
B-122	24.580	22.540	-0.612	0.729	0.137	0.444
B-123	22.330	20.610	-0.566	0.712	0.249	0.401
B-127	33.400	25.660	-1.838	0.967	-0.132	0.448
B-128A	22.040	20.250	-0.598	0.726	0.546	0.291
B-134B	38.830	34.970	-0.739	0.770	0.025	0.488
B-134	44.050	34.410	-1.725	0.957	0.069	0.472

## 5. บทสรุปการวิจัย

จากการศึกษาการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ก่อนและหลังการปรับปรุงเสริมกำลัง จะเห็นว่าค่า Probability of Failure ( $P_f$ ) มีค่าลดลงหรือมีค่าต่ำกว่า 0.5 ซึ่งถ้าค่า Probability of Failure ( $P_f$ ) มีค่าต่ำมาก ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง ( $\beta$ ) ก็จะมีค่ามากขึ้น และจะหมายความว่าโครงสร้างของอาคารมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น โดยวิธีการปรับปรุงเสริมกำลังเพื่อต้านทานโมเมนต์บวกนั้น วิธีการเสริมด้วยแผ่นเหล็กประกบข้างจะเป็นการเสริมกำลังที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด ส่วนการปรับปรุงเสริมกำลังด้วยวิธีแผ่นเหล็กใต้คานนั้นมีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อออกแบบเพื่อต้านทานแรงเฉือน การออกแบบปรับปรุงเสริมกำลังด้วย CFRP มีค่าใช้จ่ายมากที่สุด แต่เป็นวิธีการเสริมกำลังที่สะดวกที่สุดและมีน้ำหนักเบา ไม่เป็นภาระต่อโครงสร้างที่มีอยู่เดิม

ค่า Reliability index ( $\beta$ ) ของการออกแบบเสริมกำลังทั้ง 3 วิธี มีค่ามากกว่า ก่อนการออกแบบเสริมกำลัง และมีค่ามากกว่า 0 ซึ่งหมายความว่าโครงสร้างมีความปลอดภัย

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สหรัฐ พุทธวรรณะ ผู้ให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัยครั้งนี้ นื่องนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ชั้นปีที่ 4 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่มีส่วนช่วยให้ข้อมูลประกอบการทำวิจัย รวมไปถึง บิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นแรงผลักดัน สนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอด

## 7. บรรณานุกรม

- [1] Andrzej Nowak, Kevin Collins, 2000. Reliability of Structures. *The McGraw-Hill Companies, Inc.* pp.91-141.
- [2] Alfredo H-S.ANG, Wilson h. Tang, 1975. Probability Concepts in Engineering Planning and Design Volume I Basic Principles. *John Wiley & Sons.*
- [3] Alfredo H-S.ANG, Wilson h. Tang, 1984. Probability Concepts in Engineering Planning and Design Volume II Decision, Risk, and Reliability. *John Wiley & Sons., pp.333-350.*
- [4] Bruce Ellingwood, February 1978. Reliability Basis of Load and Resistance Factors for Reinforced Concrete Design. *NBS Building Science Series 110.* pp.27.
- [5] Neethu Ragi Manoj, November 25, 2016. First-order Reliability Method: Concepts and Application. Faculty of Civil Engineering and Geosciences (CiTG). Delft University of Technology, pp.6-12.
- [6] A.M.Arafah, 2000. Factors affecting the reliability of reinforced concrete beams. *2<sup>nd</sup> International Conference on Computer Simulation in Risk Analysis and Hazard Mitigation*, pp.379-387.
- [7] ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary, ACI 318M-95, American Concrete Institute, Farmington Hill, USA, 1994.
- [8] Passaworn Bunyawinij, 2018. Reliability Analysis of Foundation Before and After Strengthening, *CRMA Journal*, Vol. 16, 2018. pp.155-164.
- [9] Pankrit Yotinthanarat, 2020. Reliability Design Optimization Design for the Steel Building of Public Internet Service Center (USO NET). The 25<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineer, July 15-17, 2020 Chonburi, Thailand, pp. STR29-1-7.